УДК 622.233.5

РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПНЕВМОУДАРНОГО МЕХАНИЗМА

А.Н. Глазов

Томский политехнический университет
E-mail: ZVM@tpu.ru

Рассматривается статическая модель рабочих процессов в камерах пневмоударного механизма. Получены расчетные зависимости для определения характеристик рабочих камер и пневмоударного механизма по теоретическим индикаторным диаграммам. Даны уравнения для определения оптимальной степени наполнения рабочих камер. Приведены результаты расчетов на ПЭВМ оптимальной степени наполнения и минимального удельного расхода газа задней от штанги камеры для показателей политропы равных 1,4 и 1,0 для процессов расширения и сжатия. Представлены формулы для определения удельного расхода воздуха.

В основу методики исследования пневматических бурильных машин входит анализ индикаторных диаграмм [1]. Теоретическая индикаторная диаграмма идеального механизма является предельной статической моделью процессов в рабочей камере. Целью данной работы является получение расчётных зависимостей характеристик рабочих камер и пневмоударного механизма от параметров статической модели процессов.

При рассмотрении теоретического рабочего процесса делаются следующие допущения: рабочее тело – идеальный газ; отсутствуют потери на тре-

ние и утечки сжатого воздуха; процесс расширения сжатого воздуха протекает при неизменном показателе политропы; воздух в цилиндре не содержит влаги; неизменное состояние воздуха в камере во время наполнения и выхлопа. Рабочие процессы пневмоударного механизма в определенной степени идеализируются и отождествляются с обратимыми термодинамическими процессами.

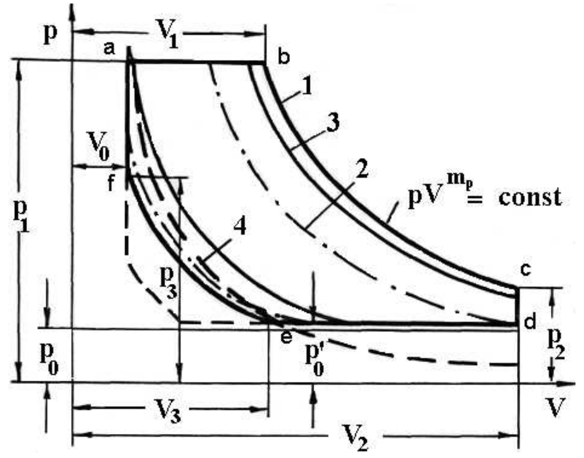


Рис. 1. *Обобщенная диаграмма (1) и расчетные оптимальные циклы процессов для ε_0=0,12, λ_0=0,185, 2) ε=4,3 3) ε=5,7 4) ε=2,1*

Обобщенная теоретическая индикаторная диаграмма процессов для задней камеры пневмоударного механизма (ПУМ) имеет вид, приведенный на рис. 1 [1 и др.]. Она состоит из фаз: *a-b* – наполнение воздухом камеры; *b-c* – процесс расширения воздуха; *c-d* – выхлоп сжатого воздуха в атмосферу; *d-e* – выталкивание воздуха из цилиндра, при котором состояние рабочего тела не изменяется, а уменьшается его масса в камере; *e-f* – процесс сжатия газа; *f-a* – впуск сжатого воздуха. Давление воздуха в задней камере в период его выталкивания p'_0, как правило, выше атмосферного p_0.

Параметрами цикла процессов являются: степени сжатия $\varepsilon=V_3/V_0$ и наполнения камеры $\varepsilon_1=V_1/V_2$; относительные величины вредного пространства $\varepsilon_0=V_0/V_2$ и давления наполнения $\lambda_0=p'_0/p_1$.

Здесь p_1 – давление воздуха при наполнении; объём воздуха: V_3 – в момент окончания выталкивания, V_0 – вредного пространства, V_1 – при наполнении; V_2 – объем камеры.

Индикаторная работа задней камеры L_{T3} за цикл с учетом политропного характера процессов

$$L_{T3}=p_1V_2\begin{bmatrix}\dfrac{\varepsilon_1-\varepsilon_1^{\,m_p}}{m_p-1}+\varepsilon_1-\varepsilon_0-\\ -\lambda_0(\dfrac{\varepsilon^{m_c}-\varepsilon}{m_c-1}\varepsilon_0-\varepsilon\varepsilon_0+1)\end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где m_p, m_c – показатели процессов расширения и сжатия воздуха. Если положить m_p=1,4, m_c=1 [2] и учесть, что

$$\lim_{m_c\to 1}(\varepsilon^{m_c}-\varepsilon)(m_c-1)^{-1}=\varepsilon\ln\varepsilon,$$

из (1) имеем

$$L_{T3}=p_1V_2\left[\frac{\varepsilon_1-\varepsilon_1^{\,1,4}}{0,4}+\varepsilon_1-\varepsilon_0-\lambda_0(\varepsilon\ln\varepsilon\varepsilon_0-\varepsilon\varepsilon_0+1)\right].$$

Теоретическое среднее индикаторное давление равно

$$p_{i3}^{\ T}=L_{T3}V_p^{\ -1}=L_{T3}[V_2(1-\varepsilon_0)]^{-1},$$

где V_p=V_2–V_0 – рабочий объем камеры.

Массовый расход воздуха за цикл

$$G_{T3}=p_1V_1(RT_1)^{-1}-p_0^{'}V_3(RT_0)^{-1}, \qquad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, T_1 – температура воздуха в процессе наполнения, T_0 – температура воздуха в момент окончания выталкивания.

Используя зависимости между параметрами процессов цикла, можно записать

$$T_0=\frac{T_1}{\left[\dfrac{p_1}{p_0}\left(\dfrac{V_0}{V_3}\right)^{m_c}\right]^{\frac{m_B-1}{m_B}}\left(\dfrac{V_3}{V_0}\right)^{m_c-1}},$$

или, выделяя безразмерные параметры,

$$T_0=T_1\lambda_0^{\frac{m_B-1}{m_B}}\varepsilon^{\frac{1-m_c}{m_B}}, \qquad (3)$$

где m_B – показатель процесса в период впуска воздуха. С учетом (3), формулу (2) можно представить в виде

$$G_{T3}=p_1V_2(RT_1)^{-1}\left(\varepsilon_1-\lambda_0^{\frac{1}{m_B}}\varepsilon^{\frac{m_c}{m_B}}\varepsilon_0\right). \qquad (4)$$

Если $m_B\to\infty$, m_c=1, то

$$G_{T3}=p_1V_2(RT_1)^{-1}(\varepsilon-\varepsilon_0).$$

Теоретический удельный расход, т.е. полезный расход воздуха в задней камере на единицу теоретической индикаторной мощности равен

$$q_{T3}=\frac{G'}{N_T}=\frac{G_{T3}}{L_{T3}}, \qquad (5)$$

где G' – расход воздуха в единицу времени, N_T – теоретическая индикаторная мощность.

После подстановки G_{T3}, L_{T3} из (4), (1) и некоторых преобразований формула (5) принимает вид

$$q_{T3}=$$
$$=\frac{\varepsilon_1-\lambda_0^{\frac{1}{m_B}}\varepsilon^{\frac{m_c}{m_B}}\varepsilon_0}{RT_1\left[\varepsilon_1\dfrac{m_p}{m_p-1}-\dfrac{\varepsilon_1^{\,m_p}}{m_p-1}-\varepsilon_0-\lambda_0\left(\dfrac{\varepsilon^{m_c}-\varepsilon}{m_c-1}\varepsilon_0-\varepsilon\varepsilon_0+1\right)\right]}.$$

На рис. 2 представлены два вида цикла передней камеры. Диаграмма, рис. 2, *а*, характерна для ПУМ, у которых управление выпуском воздуха осуществляется специальным распределителем. Это приводит к усложнению структуры механизма. При этом трудно обеспечить быстрый выхлоп воздуха, особенно у мощных ПУМ. Поэтому такой цикл применяется редко.

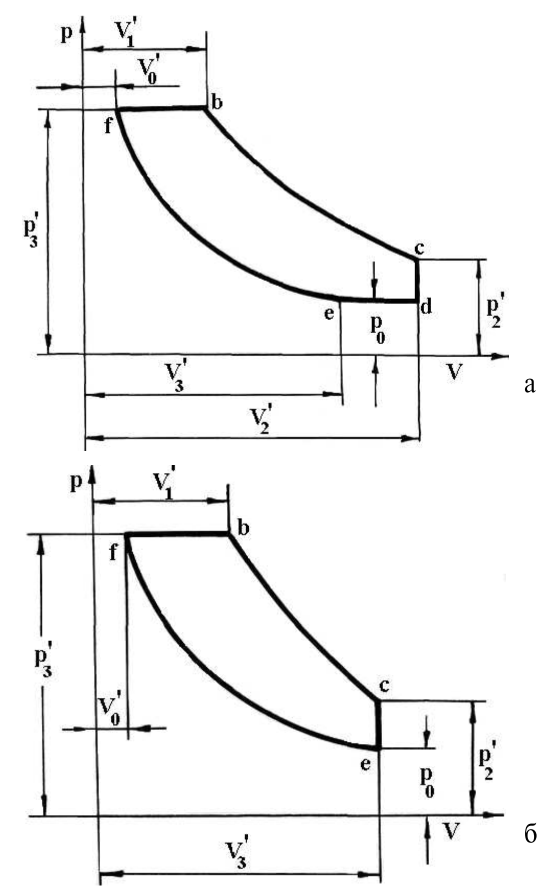


Рис. 2. *Теоретические диаграммы передней камеры пневмоударного механизма*

Возможен цикл процессов без сжатия воздуха в передней камере в период прямого хода поршня. Но это приводит к усложнению структуры управления механизмом и к необходимости быстрой подачи довольно большого объема сжатого воздуха в начале обратного хода поршня. Поэтому в известных нам промышленных образцах ПУМ такой цикл не применяется.

Цикл с выталкиванием (рис. 2, *а*) характеризуется следующими параметрами: $\varepsilon_1'=V_1'/V_2'$ – степень наполнения камеры; $\varepsilon'=V_3'/V_0'$ – степень сжатия; $\varepsilon_0'=V_0'/V_2'$ – относительная величина вредного пространства передней камеры.

Работа теоретического цикла камеры $L_{ТП}$ выражается площадью, ограниченной контуром индикаторной диаграммы (рис. 2, *а*).

$$L_{ТП}=\frac{1}{m_p-1}(p_3'V_1'-p_2'V_2')-$$

$$-\frac{1}{m_c-1}(p_3'V_0-p_0V_3')+p_3'(V_1'-V_0')-p_0(V_2'-V_3').$$

После введения безразмерных параметров цикла и некоторых преобразований, с учетом политропного характера процессов, получим

$$L_{ТП}=p_0V_2'\left[\begin{array}{l}\dfrac{\varepsilon'^{m_c}\varepsilon'(1-\varepsilon_1'^{m_p-1})}{m_p-1}-\dfrac{\varepsilon_0'\varepsilon'(\varepsilon'^{m_c-1}-1)}{m_c-1}+\\+\varepsilon'^{m_c}(\varepsilon_1'-\varepsilon_0')-1+\varepsilon'\varepsilon_0'\end{array}\right].$$

Теоретический цикл (рис. 2, *б*) осуществляется на части длины хода поршня и имеет 4 фазы: f-b – наполнение камеры воздухом; b-c – процесс расширения воздуха; c-e – выхлоп воздуха; e-f – процесс сжатия воздуха. Его характеризуют параметры: $\varepsilon_1'=V_1'/V_3'$, $\varepsilon'=V_3'/V_0'$, $\varepsilon_0'=V_0'/V_3'$.

Работа теоретического цикла рабочих процессов в передней камере определяется как алгебраическая сумма работ с учетом политропного характера процессов.

$$L_{ТП}=\frac{1}{m_p-1}(p_3'V_1'-p_2'V_3')-$$

$$-\frac{1}{m_c-1}(p_3'V_0'-p_0V_3')+p_3(V_1'-V_0')$$

или $$L_{ТП}=p_0V_3'\left[\begin{array}{l}\dfrac{\varepsilon'^{m_c}\varepsilon_1'(1-\varepsilon'^{m_p-1})}{m_p-1}-\\-\dfrac{\varepsilon'^{m_c-1}-1}{m_c-1}+\varepsilon'^{m_c}(\varepsilon_1'-\varepsilon'^{-1})\end{array}\right].$$

При $m_p=m_c=1{,}4$ работа равна

$$L_{ТП}=p_0V_3'\left[\begin{array}{l}\dfrac{\varepsilon'^{1,4}\varepsilon_1'(1-\varepsilon'^{0,4})}{0,4}-\\-2,5(\varepsilon'^{0,4}-1)+\varepsilon'^{1,4}(\varepsilon_1'-\varepsilon'^{-1})\end{array}\right].$$

Среднее индикаторное давление воздуха

$$p_{iП}{}^{T}=L_{ТП}/V_3'(1-\varepsilon').$$

Массовый расход воздуха равен

$$G_{ТП}=\frac{p_3'V_1'}{RT_1}-\frac{p_0V_3'}{RT_0}=\frac{p_0V_3'\varepsilon'^{m_c}}{RT_1}(\varepsilon_1'-\varepsilon'^{-1}).$$

При анализе работы и проектировании пневматического механизма представляет значительный интерес определение оптимального значения степени наполнения. Как и при всякой оптимизации, результат может зависеть от выбора критерия оптимальности. Разумным критерием служит теоретический удельный расход воздуха q_T.

Очевидно, что при $\varepsilon_1=1$ достигается максимум индикаторной работы цикла, но при этом увеличивается и расход сжатого воздуха. Представляет интерес, при каком значении ε_1 достигается минимальный удельный расход воздуха. Математически задача оптимизации сводится к определению значения ε_1, минимизирующего $q_T(\varepsilon_1)$. Эта задача решена в работе [3] и получено уравнение

$$\varepsilon_1=f(\varepsilon_1),$$

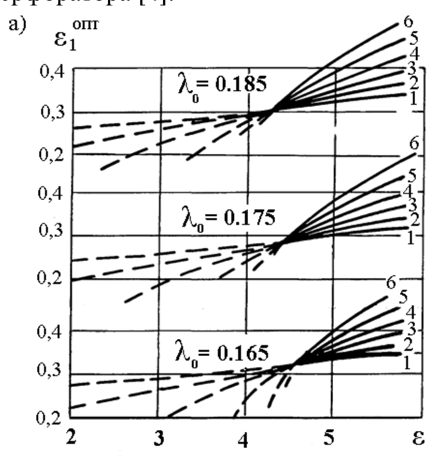
где $$f(\varepsilon_1)=\frac{m_p\lambda_0^{\frac{1}{m_B}}\varepsilon^{\frac{m_c}{m_B}}\varepsilon_0}{m_p-1}+$$

$$+\left[\begin{array}{l}\varepsilon_0\lambda_0\left(\dfrac{\varepsilon^{m_c}-\varepsilon}{m_c-1}\varepsilon_0-\varepsilon\varepsilon_0+1\right)-\\-\left(\lambda_0^{\frac{1}{m_B}}\varepsilon^{\frac{m_c}{m_B}}\varepsilon_0\right)\dfrac{m_p}{m_p-1}\end{array}\right]\varepsilon_1^{m_p-1}.$$

Для его решения применяется метод последовательных приближений (метод итераций). Алгоритм

итераций сводится к вычислению по схеме $(\varepsilon_1)_i=f[(\varepsilon_1)_{i-1}]$, $i=1,2...$; $(\varepsilon_1)_0$ – начальное значение ε_1.

В соответствии с алгоритмом проведены расчеты на ПЭВМ оптимального параметра $\varepsilon_1^{опт}$ и минимального удельного расхода воздуха $q_{\min}$ для широкого диапазона значений параметров цикла. Фрагменты результатов исследования представлены на рис. 3, 4 для случая $m_p=1{,}4$; $m_B=\infty$; $m_c=1$. Такие показатели близки к фактическим для ударного узла перфоратора [4].



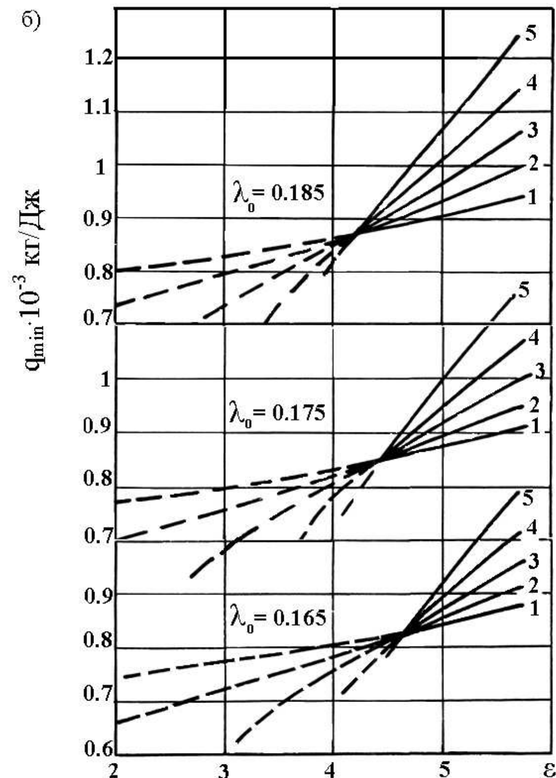


Рис. 3. *Зависимости а) оптимальной степени наполнения камеры и б) минимального удельного расхода воздуха от параметров цикла: 1–6)* $\varepsilon_0=0{,}06;\ 0{,}09;\ 0{,}12;\ 0{,}15;\ 0{,}18;\ 0{,}21$

Точка пересечения кривых соответствует предельному значению ε_1, при котором происходит полное расширение сжатого воздуха от начального давления p_1 до конечного p_0' (диагр. 2 на рис. 1). При большем значении ε_1 получается цикл процессов 3 (рис. 1) с неполным расширением воздуха. Уменьшение ε_1 против предельного значения приводит к диаграмме с отрицательной петлей работы или к циклу работы на части рабочей длины цилиндра. Из графика (рис. 3) видно, что только при ε выше предельной величины, увеличение ε_0 приводит к возрастанию ε_1 и $q_{\min}$.

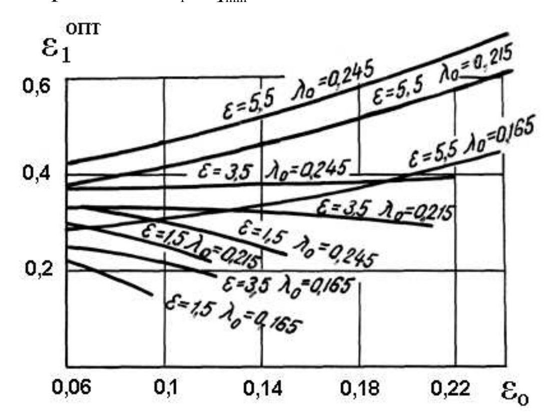


Рис. 4. *Зависимость оптимальной степени наполнения от относительной величины вредного пространства*

Увеличение относительной величины давления выхлопа λ_0, степени обратного сжатия ε при постоянном ε_0 приводит к увеличению $\varepsilon_1^{опт}$ и $q_{\min}$. Интенсивность возрастания $\varepsilon_1^{опт}$ и $q_{\min}$ по ε тем выше, чем больше исходная величина ε_0. Это объясняется тем, что большим значениям ε_0 соответствуют более высокие величины объема воздуха в начале его сжатия $V_3=\varepsilon V_0$, что увеличивает работу обратного сжатия.

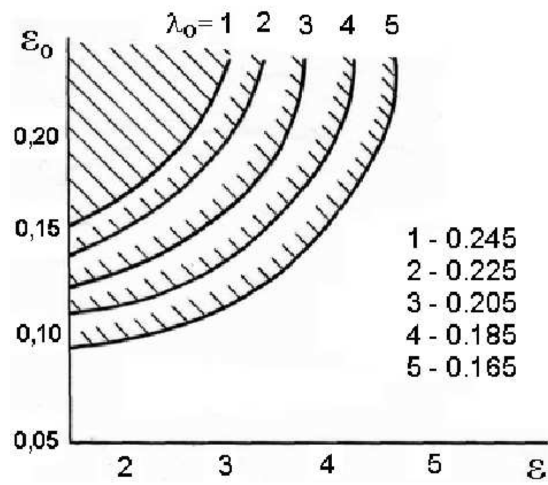


Рис. 5. *Зоны существования* $\varepsilon_1^{опт}$

Расчеты показали, что есть область значений параметров цикла, заштрихованная на рис. 5, в которой $q_{\min}$ и $\varepsilon_1^{опт}$ не существуют, т.е. задача оптимизации цикла не решается.

Степень наполнения передней камеры ε_1' можно определить методом итераций из следующего уравнения

$$\varepsilon_1' = \frac{\varepsilon_1'^{m_p}}{m_p} + \left(\gamma + \frac{L_{TП}}{p_0 V_3'}\right)\alpha^{-1},$$

где $\gamma = \varepsilon'^{m_c-1}\left(\frac{m_c}{m_c-1}\right) - \frac{1}{m_c-1}$,

при m_c=1,4 γ=3,5$\varepsilon'^{0,4}$–2,5;

$\alpha = \varepsilon'^{m_c}\frac{m_p}{m_p-1}$, при m_p=1,4 α=3,5$\varepsilon'^{1,4}$.

Теоретическая индикаторная работа сжатого воздуха по совершению прямого хода поршня равна

$$L_{T_p} = L_1 + L_3 - L_0 - L_{сж}, \qquad (6)$$

где L_1=$p_1V_2(m_p-1)^{-1}(\varepsilon_1-\varepsilon_1^{m_p})$ – работа расширения сжатого воздуха в задней камере, L_3=$p_1V_2(\varepsilon_1-\varepsilon_0)$ – работа наполнения воздухом задней камеры, L_0=p_0V_2 – работа газа при изменении объема с V_2 до V_0,

$$L_{сж} = p_0V'_3(m_c-1)^{-1}(\varepsilon'^{m_c-1}-1) - p_0V'_3(1-\varepsilon'^{-1}).$$

После подстановки в зависимость (6) выражений ее составляющих работ получим

$$L_{T_p} = p_1V_2\left(\frac{\varepsilon_1-\varepsilon_1^{m_p}}{m_p-1} + \varepsilon_1 - \varepsilon_0\right) - p_0V_2(1-\varepsilon_0) -$$

$$-p_0V'_3\left(\frac{\varepsilon'^{m_c-1}-1}{m_c-1} - 1 + \varepsilon'^{-1}\right).$$

Энергия удара равна

$$A_у = L_{T_p}\eta_{мех\,з}\eta'_П,$$

где $\eta_{мех.з}$ – механический КПД прямого хода поршня, $\eta'_П$ – коэффициент полноты силовой диаграммы, равный отношению действительной и теоретической работ сжатого воздуха по перемещению поршня в период прямого хода.

Работа теоретического цикла передней камеры связана с индикаторной работой задней камеры

$$L_{TП} = \frac{A_у}{\eta_{мех}} - L_{T3},$$

где $\eta_{мех}$ – механический КПД ПУМ.

Удельный расход воздуха пневмоударного механизма

$$q = \frac{G_T}{A_у\eta_у\rho_н} = \frac{G_{T3}+G_{TП}}{L_{T_p}\eta_{мех\,з}\eta'_П\eta_у\rho_н}$$

или с учетом того, что часть энергии удара отражается

$$q = \frac{G_{T3}+G_{TП}}{A_у(1-k_0^2)\eta_у\rho_н},$$

где G_T – теоретический расход воздуха ПУМ, $\eta_у$=G_T/G – коэффициент утечек, G – фактический расход воздуха, $\rho_н$ – плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях, k_0=$(A_0/A_у)^{1/2}$ – коэффициент отскока, A_0 – энергия отскока поршня. Если принять КПД равными единице, то получатся значения энергетических параметров и удельного расхода идеального пневмоударного механизма, что позволяет, в частности, оценить совершенство реального устройства.

Выводы

Получены зависимости для определения энергетических и расходных характеристик рабочих камер и пневмоударного механизма.

Показано, что задача определения оптимальной степени наполнения задней камеры имеет решение. Получены графические зависимости оптимальной степени наполнения и минимального удельного расхода воздуха от параметров цикла процессов. Увеличение объёма вредного пространства приводит к возрастанию минимального удельного расхода при определённом интервале значений степени сжатия. Зависимость степени наполнения и удельного расхода воздуха от степени сжатия тем значительней, чем выше значение относительного давления вредного пространства и давление недовыхлопа. Показано, что существует область значений параметров цикла, при котором задача определения оптимальной степени наполнения и минимального расхода не имеет решения.

Получено уравнение для определения степени наполнения передней камеры, которая зависит от параметров и индикаторной работы задней камеры.

Представленные результаты будут полезны при синтезе и оценке совершенства конструкций пневмоударных механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О.Д., Басов И.Г., Горбунов В.Ф., Маликов Д.Н. Бурильные машины. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 360 с.
2. Глазов А.Н. Снижение удельного расхода воздуха пневматических машин ударного действия // Известия вузов. Горный журнал. – 1977. – № 2. – С. 102–105.
3. Глазов А.Н., Глазов Г.Н. Оптимальная степень наполнения камеры сжатым воздухом // Известия вузов. Горный журнал. – 1988. – № 6. – С. 84–87.
4. Глазов А.Н. Рабочие процессы пневмоударного механизма перфоратора // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 132–136.